

عملکرد سیانوباکتر اسپیرولینا در حذف ارتوفسفات از فاضلاب شبیه سازی شده

ساناز جعفری^{۱*} و افشار علی حسینی^۲

۱- گروه مهندسی شیمی، گرایش محیط زیست، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال
۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۰۲

چکیده

در این تحقیق اثر و کاربرد بیوراکتور حاوی جلبک اسپیرولینا در حذف ارتوفسفات از فاضلاب شبیه سازی شده و عوامل تأثیرگذار بر بیوراکتور بررسی شده است. برای این منظور از فتوبیوراکتور ماریپیچی شکل و محیط کشت Zarrouk به عنوان محیط کشت مناسب برای حذف فسفر از فاضلاب استفاده شد. ریز جلبک به صورت جلبک تثبیت شده در محیط کشت با مقادیر مختلف هوادهی (صفر و ۱/۳ لیتر در دقیقه) به ۴/۵ لیتر فاضلاب که در فتوبیوراکتور ریخته شده، اضافه گردید و غلظت ارتوفسفات جذب شده در زمان‌های مختلف توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. در یک دوره ۱۸ روزه عملکرد جلبک اسپیرولینا در حذف ارتوفسفات از فاضلاب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با هوادهی صفر لیتر در دقیقه غلظت ارتوفسفات از ۳۸/۴۶ به ۱۱/۵۴ لیتر در دقیقه و با هوادهی ۱/۳ لیتر در دقیقه غلظت ارتوفسفات از ۶۰ به ۱۲ میلی گرم در لیتر کاهش می‌یابد. به عبارتی عملکرد بیوراکتور حاوی جلبک اسپیرولینا در حذف ارتوفسفات در حالت بدون هوادهی با بازده ۶۹/۹ درصد و در حالت هوادهی دارای بازده ۸۰ درصد (میانگین‌ها با سه بار تکرار) می‌باشد.

واژگان کلیدی: ریز جلبک، اسپیرولینا، ارتوفسفات، فاضلاب

مقدمه

فاضلاب‌های صنعتی و شهری از عمده‌ترین منابع آلاینده محیط زیست هستند و با توجه به نوع فاضلاب و همچنین نوع مواد آلاینده موجود در آنها، می‌توانند سبب ایجاد آلودگی در محیط زیست شوند (De-Bashan *et al.*, 2008). فسفات از آلاینده‌های غیر آلی است که در فاضلاب‌های شهری و با مقادیر متفاوتی در فاضلاب‌های صنعتی یافت می‌شود و غلظت آن در دریاچه‌ها و دریاها به دلیل تخلیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی به سرعت در حال افزایش است (محمد یاری و بلاد، ۱۳۸۷). فسفر به شکل‌های مختلفی از جمله ارتوفسفات، پلی فسفات و فسفر آلی در فاضلاب‌ها یافت می‌شود و غلظت آن در فاضلاب‌های شهری به طور متوسط بین ۴ تا ۱۶ میلی‌گرم فسفر است و در خروجی تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری غلظت آن به حدود ۲ تا ۵ میلی‌گرم در لیتر کاهش می‌یابد (Pinar *et al.*, 2010).

فسفات و نیتрат از ریز مغذی‌های ضروری برای رشد جلبک‌های فتوسینتیک و سیانوباکترها هستند و در صورت ورود بیش از حد، باعث رشد شدید جلبک شده و متعاقب آن پدیده یوتروفیکاسیون بروز می‌نماید (کرمانی و همکاران، ۱۳۸۹). از میان این دو عنصر، اغلب فسفات عامل کنترل کننده در بروز پدیده یوتروفیکاسیون است، به همین دلیل لازم است که فسفات موجود در پساب‌های شهری و صنعتی با استفاده از روش‌های مناسب حذف گردیده و به حد استاندارد رسانده شود تا از بروز این پدیده خطرناک جلوگیری گردد. در حال حاضر روش‌های بیولوژیک، متداول‌ترین روش مورد استفاده برای حذف فسفر است، لیکن این روش‌ها دارای مشکلاتی از قبیل زمان ماند طولانی، کارایی نسبتاً پایین و همچنین مشکلات بهره‌برداری هستند (Smita & Ashok, 2006).

تحقیقات دهه‌های اخیر پژوهشگران در استفاده از ریزجلبک‌ها در تصفیه پساب نشان می‌دهد که این

موجودات تک سلولی می‌توانند انتخابی مناسب برای این منظور باشند. کاربرد ریز جلبک در تصفیه پساب براساس اصول اکوسیستم طبیعی بنا نهاده شده است، در نتیجه از نظر محیط زیستی مضر نیستند. همچنین قابلیت بازیافت مناسب مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) از پساب را داشته و در صورت باز مصرف توده زیستی تولیدی، هیچگونه آلودگی ثانویه‌ای ایجاد نمی‌گردد (Martinez *et al.*, 2000). ریزجلبک‌ها برای ساخت پروتئین، اسیدهای نوکلئیک و فسفولیپید، مواد مغذی را از پساب جذب نموده و همچنین قادر به جذب فلزات سنگین و آلاینده‌های سمی از پساب هستند (De-Bashan *et al.*, 2008; Semple *et al.*, 1999 Fierro و همکاران حذف نیتروژن نیتراتی و ارتوفسفات توسط ریزجلبک سندسموس تثبیت شده و آزاد را بررسی کرده و نشان دادند که سلول‌های تثبیت شده ۷۰ درصد نیترات و ۹۴ درصد ارتوفسفات را طی ۱۲ ساعت از محیط حذف نمودند درحالی که سلول‌های آزاد ۲۰ درصد نیترات و ۳۰ درصد ارتوفسفات را در مدت ۳۶ ساعت حذف کرده بودند. (Fierro *et al.*, 2007) Tam و Wong نیز در تحقیق مشابهی حذف نیتروژن آمونیومی و ارتوفسفات از پساب درسیستم حاوی سلول‌های آزاد و تثبیت شده کلرلاولگاریس را مقایسه کردند و راندمان حذف آمونیوم و ارتوفسفات در سیستم تثبیت شده، به ترتیب ۷۸ و ۹۴ درصد و در سیستم با سلول آزاد ۶۶ و ۵۹ درصد گزارش کرده بود (Tam & Wong, 2000).

در پژوهشی دیگر حذف مواد مغذی توسط راکتور SBR (Sequencing Batch Ractor) مورد بررسی قرار گرفت و بازدهی و حذف این راکتور برای فسفر ۹۷/۳ درصد به دست آمد و نشان داد که SBR توانایی حذف غلظت بالایی را حتی در دمای کمتر از یک درجه دارد (Obaja *et al.*, 2003). علاوه بر ویژگی‌های اشاره شده، ریزجلبک‌ها فعالیت عوامل بیماریزا، بر اثر افزایش pH و کاهش اکسیژن محلول در پساب خروجی را کاهش می‌دهند (Ghasemi *et al.*, 2007).

بیوراکتور با میزان هوادهی مختلف در حذف ارتوفسفات از فاضلاب شبیه سازی شده مورد مطالعه قرار گرفته و عوامل تأثیر گذار بر فعالیت ریز جلبک اسپیرولینا بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

ریز جلبک *Spirulina* از شرکت نانوشیمی ساخته تهیه شد. ترکیبات محیط کشت برای کشت جلبک در جدول (۱) ارائه شده است. این میزان محیط کشت برای ۲۰۰ میلی‌لیتر جلبک اسپیرولینا زنده مناسب می‌باشد.

میزان زیاد پروتئین و رشد سریع ریزجلبک و نیز عدم احتمال ایجاد بیماری توسط این پروتئین تک یاخته نشان می‌دهد که می‌توان از ریزجلبک‌ها به عنوان منابع غذایی مناسب برای انسان و دام استفاده نمود (Nunez et al., 2001). در بین ریزجلبک‌ها *Spirulina*، از سیانوباکتريا (جلبک‌های سبز- آبی) دارای ارزش غذایی و اهمیت ویژه‌ای است. نام اسپیرولینا از واژه لاتین اسپیرا (Spira) به معنای مارپیچی می‌آید که البته از شکل این جلبک نشأت گرفته است (Belay, 2002). در تحقیق حاضر، عملکرد ریزجلبک اسپیرولینا به صورت سلول تثبیت شده، در

جدول ۱- اجزاء محیط کشت Zarrouk

نام محلول	نیاز مورد مقادیر	میزان مورد نیاز (gf)
Solution A	$NaHCO_3$	۴
	$NaNO_3$	۲/۵
	$CaCl_2$	۰/۰۴
	NaCl	۱
	K_2SO_4	۱
	$Fe_2(SO_4)_3$	۱
	Na_2HPO_4	۰/۵
	$ZnSO_4$	۱
	$MgSO_4$	۰/۲
	EDTA	۰/۸
Solution B (Trace element solution 1 ^{cc})	$H_{24}Mo_7N_6O_{24}$ NH_4NO_3 LiCl $C_{29}H_{50}O_2$	۰/۰۱

کشت در محیط آزمایشگاه در جدول (۲) ارائه شده است. به منظور بررسی اثر هوادهی بر عملکرد ریزجلبک، هوادهی به میزان صفر و ۱/۳ لیتر در دقیقه برای تیمارها انجام شد. حذف فسفر در دامنه pH بین ۸ الی ۹ صورت گرفت. پس از آنکه جلبک اسپیرولینا در محیط کشت تثبیت شد در فتوبیوراکتور ریخته شد و در مجاورت فاضلاب شبیه‌سازی شده قرار گرفت تا در اثر رشد جلبک میزان حذف ارتوفسفات بررسی گردد. برای این منظور، ابتدا ۰/۵ میلی گرم در لیتر

ترکیبات فاضلاب شبیه‌سازی شده تقریباً مشابه محیط کشت (Solution A) برای رشد ریزجلبک بود با این تفاوت که میزان ارتوفسفات در ترکیب Na_2HPO_4 که به عنوان منبع ارتوفسفات استفاده شده است (ثابتی و همکاران، ۱۳۹۲) به ترتیب به میزان (۱۶/۶۹، ۶۰، ۴۳/۵۷، ۵۰، ۸۶/۴۲، ۴۳/۳۷) میلی گرم در لیتر) آماده شد. در پژوهش حاضر، از یک فتوبیوراکتور مارپیچی شکل ۲۵ لیتری استفاده شد. فضای مورد استفاده در فتوبیوراکتور ۵ لیتر بود. شرایط

توده زنده جلبک با ۴/۵ لیتر فاضلاب شبیه سازی شده شده به وسیله اسپکتروفتومتر مدل (DR/4000 با غلظت‌های مختلف ارتوفسفات مخلوط گردید. بعد از مدت ۲ روز همراه با همزدن، میزان ارتوفسفات جذب

ارزیابی گردید و مدل‌های ایزوترمی جذب ارتوفسفات مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۳).

جدول ۲- شرایط کشت اسپیروولینا برای حذف ارتوفسفات در محیط آزمایشگاه

دما	۲۵-۲۷ درجه سانتی گراد
محیط کشت Zarrouk	۱ لیتر
ریزجلبک اسپیرولینا	۲۰۰ میلی لیتر (20CFU)
منبع نوری	یک عدد مهتابی ۴۰ وات
پمپ آب	۳۰۰۰ وات
pH	۸-۹
پمپ هوادهی	۱/۳ لیتر بر دقیقه

جدول ۳- ایزوترم‌های جذب و معادلات مربوط به آن

ردیف	نوع ایزوترم	معادله غیر خطی	معادله خطی
۱	لانگمویر	$q_e = q_{max} b c_e / (1 + b c_e)$	$1/q_e = 1/b q_{max} c_e + 1/q_{max}$
۲	فروندلیچ	$q_e = K_f c_e^{1/n}$	$\ln q_e = \ln K_f + 1/n \ln c_e$
۳	دوبینین رادوشکویچ	$q_e = q_{max} \exp(\beta \varepsilon^2)$	$\ln q_e = \ln q_{max} - \beta \varepsilon^2$
۴	تمکین	$q_e = RT \ln(A_T c_e) / B_T$	$q_e = B_T \ln A_T + B_T$

مکزی‌م انرژی پیوندی می‌باشد
در اینجا مقدار q_e به ازای هر C_e به صورت تجربی از معادله (۱) به دست می‌آید

$$q_e = (C_0 - C_e) X_0 \quad (1)$$

C_0 و C_e : به ترتیب غلظت ارتوفسفات در جریان‌های ورودی و خروجی (mg/l)
 X_0 : دوز مصرفی بیومس که عبارت است از مقدار جرم بیومس در واحد حجم آبی (mg/l)
در معادله دوبینین رادوشکویچ ε از معادله (۲) به دست آمد.

$$\varepsilon = RT \ln(1 + (1/C_e)) \quad (2)$$

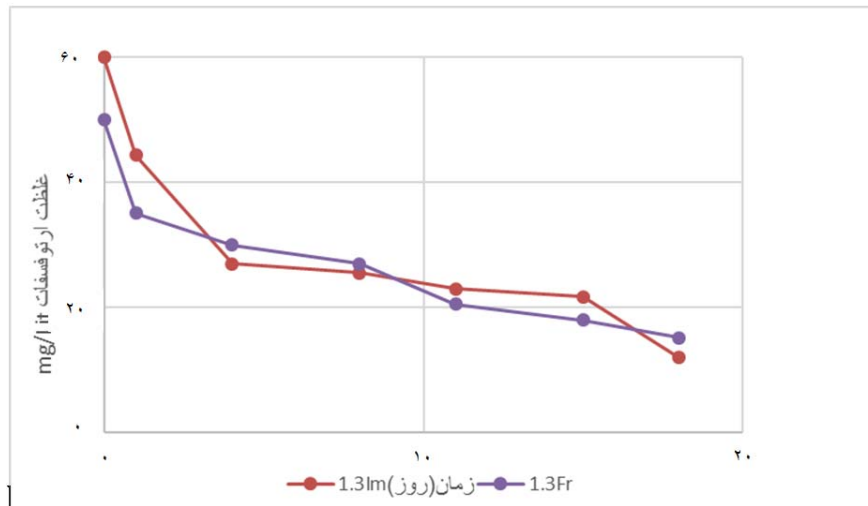
برای انجام محاسبات از نرم افزار آماری SPSS و Excel استفاده گردید.

در معادلات اشاره شده در جدول (۳):
 q_e : مقدار آلاینده جذب شده بر حسب واحد جرم بیومس (mmol/g) (mg/g) در هر لحظه
 q_{max} : حداکثر ظرفیت جذب بوسیله بیومس (mg/g) یا (mmol/g)
 C_e : غلظت تعادلی آلاینده (mg/Lit)
 b : ثابت لانگمویر که معرف میل ترکیبی بین جاذب و جذب شونده می‌باشد
 K_f و n : ثابت‌های فروندلیچ که به ترتیب معرف ظرفیت جذب و شدت جذب می‌باشند
 β : ضریب فعالیت مربوط به انرژی جذب سطحی متوسط می‌باشد
 ε : پتانسیل
 T : دمای مطلق در مقیاس کلوین
 R : ثابت جهانی گازها ($8/314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
 B_T : عدد ثابت مربوط به گرمای جذب
 A_T : ثابت پیوندهای تعادلی است که متناظر با

نتایج

در تحقیق حاضر، جلبک اسپیرولینا طی یک دوره ۱۸ روزه در محیط کشت قرار داده شد و عملکرد آن طی ۲ روز در جذب ارتوفسفات از فاضلاب شهری مورد

بررسی قرار گرفته است. شکل (۱) حذف ارتوفسفات از پساب را در زمان‌های مختلف برای دو حالت بدون هوادهی و هوادهی نشان می‌دهد.



شکل ۱- روند تغییرات و حذف ارتوفسفات در پساب توسط جلبک اسپیرولینا طی ۱۸ روز در تیمارهای مختلف Im: جلبک تثبیت شده 1/3Im: جلبک تثبیت شده

همان گونه که شکل (۱) نشان می‌دهد، راندمان کلی حذف ارتوفسفات توسط تیمارهای ریزجلبک تثبیت شده در حالت بدون هوادهی ۶۹/۹ درصد و هوادهی با دبی ۱/۳ لیتر در دقیقه، ۸۰ درصد می‌باشد. برای

بررسی ایزوترم‌های جذب توسط جاذب اسپیرولینا به غلظت اولیه و غلظت حالت تعادل نیاز می‌باشد. جدول (۴) میزان جذب ارتوفسفات در غلظت‌های متفاوت توسط توده زنده (جلبک زنده) را نشان می‌دهد.

جدول ۴- بررسی میزان جذب ارتوفسفات در غلظت‌های متفاوت در زمان ۲ روز توسط اسپیرولینا

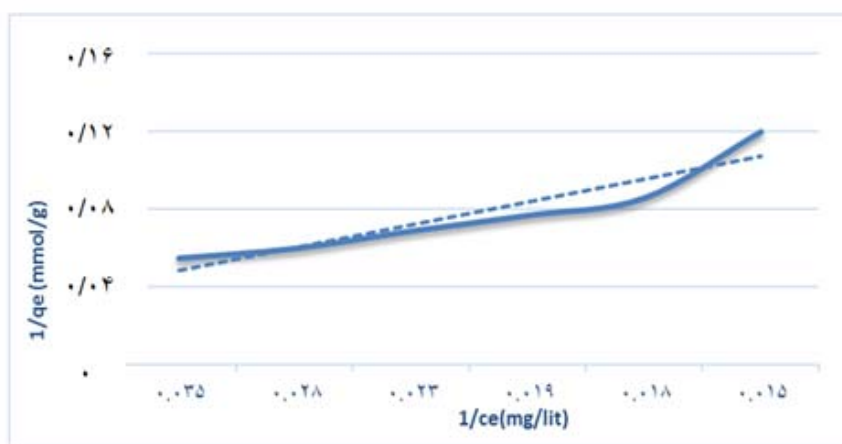
Langmuir equation		
$Y = 0.011X + 0.036$		
Parameters		
b		
۲۷/۸۷	۳/۲۷۰	۰/۸۷۳

بررسی میزان جذب ارتوفسفات توسط جلبک اسپیرولینا پرداخته شده است. شکل (۲) ایزوترم جذب لانگمیر برای جذب ارتوفسفات توسط بیومس در ۲۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. شیب خط $1/q_{\max}$ و عرض از مبدا b/q_{\max} حاصل شد که با محاسبه پارامترهای b و q_{\max} و جایگزینی در معادله غیر خطی جدول (۳) مقدار q_e قابل محاسبه می‌باشد. نتایج در جدول (۵) گزارش شده است.

x_0 : دوز مصرفی توده زنده که عبارت است از مقدار جرم در واحد حجم آبی (mg/Lit)
 C_0 و C_e : به ترتیب غلظت ارتوفسفات در جریان‌های ورودی و خروجی (mg/Lit)
 q_e : مقدار آلاینده جذب شده برحسب واحد جرم توده زنده (mg/g) یا (mmol/g) در هر لحظه همان طور که در جدول (۴) مشاهده می‌گردد، جلبک اسپیرولینا در محیط‌های قلیایی متفاوتی کشت داده شده است. در ادامه با توجه به محیط‌های قلیایی، به

جدول ۵- ثوابت ایزوترم لانگمیر جذب ارتوفسفات توسط جلبک اسپیرولینا

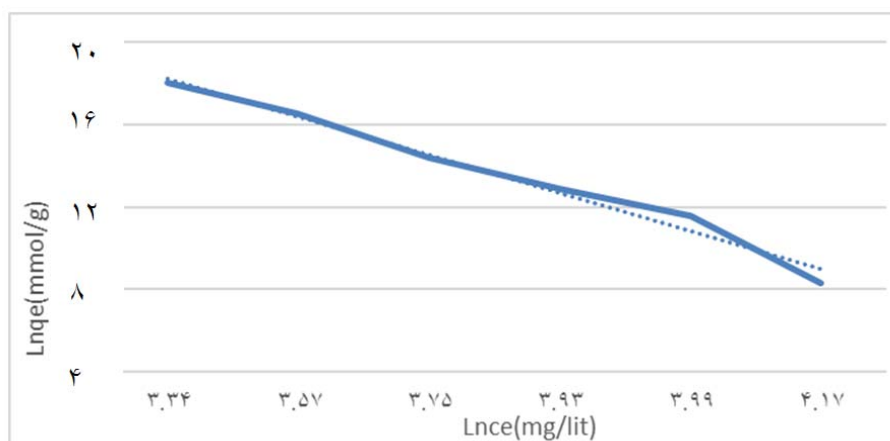
pH	X_0 (mg/Lit)	C_0 (mg/Lit)	C_e (mg/Lit)	
۹/۳	۰/۵	۳۷/۴۲	۲۸/۴	۱۸/۰۴
۹	۰/۵	۴۳/۴۸	۳۵/۶	۱۶/۵۲
۸/۷	۰/۵	۵۰/۰۰	۴۲/۸	۱۴/۴۰
۸/۵	۰/۵	۵۷/۴۳	۵۱/۰۰	۱۲/۸۶
۸	۰/۵	۶۰/۰۰	۵۴/۲۰	۱۱/۶۰
۷/۵	۰/۵	۶۸/۰۰	۶۵/۰۰	۸/۳۲



شکل ۲- ایزوترم لانگمیر جذب ارتوفسفات توسط ۰/۵ میلی گرم در لیتر جلبک اسپیرولینا طی روز ۲

جایگزینی در معادله غیر خطی جدول (۳) مقدار q_e محاسبه شده است. نتایج در جدول (۶) گزارش شده است.

شکل (۳) ایزوترم فروندلیچ برای جذب ارتوفسفات توسط جلبک را نشان می‌دهد که یک خط راست با شیب $1/n$ و عرض از مبدا k_f حاصل می‌شود و با



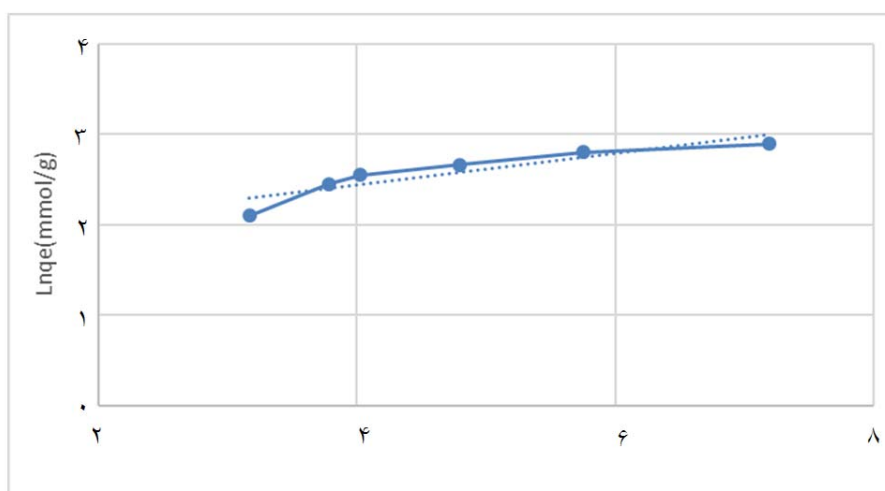
شکل ۳- ایزوترم فروندلیچ جذب ارتوفسفات توسط ۰/۵ میلی گرم در لیتر جلبک اسپیرولینا طی ۲ روز

جدول ۶- ثوابت ایزوترم فروندلیچ جذب ارتوفسفات توسط جلبک اسپیرولینا

Freundlich equation		
$Y = -1.854X + 20.11$		
Parameters		
	n	
۲۰/۱۱	-۰/۶۱۳	۰/۹۸۱

(۳) مقدار q_e قابل محاسبه می‌باشد. نتایج در جدول (۷) ارائه شده است.

بررسی ایزوترم دوبینین رادوشکویچ از شکل (۴) یک خط راست با شیب و عرض از مبدا q_{max} حاصل می‌شود که با جایگزینی در معادله غیر خطی جدول



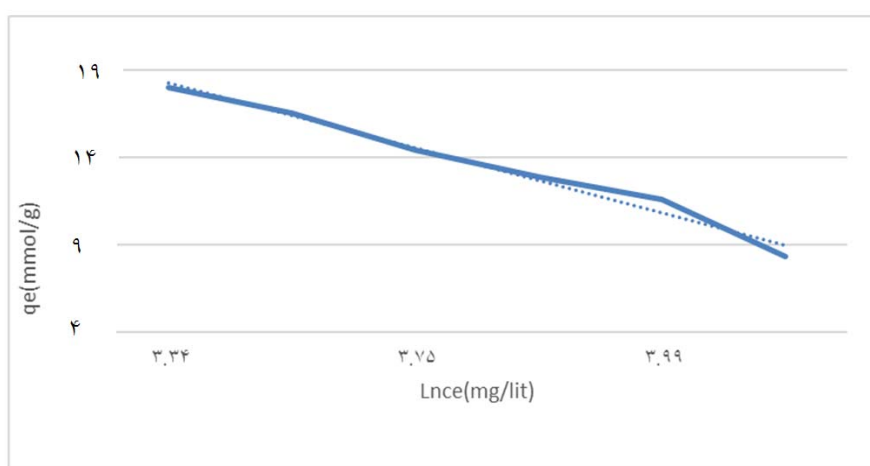
شکل ۴- ایزوترم دوبینین رادوشکویچ جذب ارتوفسفات توسط ۰/۵ میلی گرم در لیتر توسط جلبک اسپیرولینا طی ۲ روز

جدول ۷- ثوابت ایزوترم دوبینین رادوشکویچ جذب ارتوفسفات توسط جلبک اسپیرولینا

Dubinin-Radushkevich equation		
$Y = 0.173X + 1.745$		
Parameters		
q_m	β	R^2
۰/۱۷۳	۱/۷۴۵	۰/۸۱۹

برای بررسی ایزوترم تمکین از شکل (۵) یک خط راست با شیب B_T و عرض از مبدا A_T حاصل می‌شود که با جایگزینی در معادله غیر خطی جدول (۳) مقدار q_e قابل محاسبه می‌باشد. نتایج در جدول (۸) گزارش شده است.

برای بررسی ایزوترم تمکین از شکل (۵) یک خط راست با شیب B_T و عرض از مبدا A_T حاصل می‌شود که با جایگزینی در معادله غیر خطی جدول (۳) مقدار



شکل ۵- ایزوترم تمکین جذب ارتوفسفات توسط ۰/۵ میلی گرم در لیتر جلبک اسپیرولینا طی ۲ روز

جدول ۸- ثوابت ایزوترم تمکین جذب ارتوفسفات توسط جلبک اسپیرولینا

Temkin equation		
$Y = -1.854X + 20.11$		
Parameters		
B_T	A_T	R^2
-۱/۸۵۴	۲۰/۱۱	۰/۹۸۱

ریزجلبک تثبیت شده در دو حالت بدون هوادهی و هوادهی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که وجود ریزجلبک در حذف ارتوفسفات از پساب تأثیرگذار بود و اثر هوادهی در تیمار حاوی ریزجلبک تثبیت شده، به مراتب از تیمار بدون ریزجلبک بیشتر بود. به طوری که هوادهی برای ریزجلبک، باعث شد که رشد و فعالیت جلبک بیشتر گردد و در نتیجه راندمان حذف به ۶۰ درصد افزایش یافت.

داده‌های حاصل از ترسیم نمودار تمکین (۰/۹۸۱۵) نشان می‌دهد که این نوع ایزوترم پوشش نسبتاً مناسبی بر جذب ارتوفسفات توسط ریز جلبک اسپیرولینا دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عملکرد ریزجلبک اسپیرولینا از نظر حذف ارتوفسفات از فاضلاب شبیه‌سازی شده با

- خاص
- عدم آلودگی محیط زیست و پالایش سریع طبیعت
 - مقایسه نتایج تحقیقات مختلف بر روی گونه‌های مختلف ریز جلبک برای حذف ارتوفسفات در جدول (۹) آورده شده است.

- این جلبک دارای ویژگی‌های منحصر به فردی می‌باشد که عبارتند از:
- هزینه پایین عملیات و صرفه اقتصادی آن
 - انجام مراحل حذف در زمان کوتاه
 - بهره‌گیری تجهیزات و ابزار کار ساده و ارزان قیمت
 - عدم نیاز به کنترل‌های پیچیده و تخصص‌های

جدول ۹- مقایسه راندمان حذف ارتوفسفات توسط گونه‌های مختلف ریزجلبک

تاریخ	محقق	ریزجلبک	جلبک تثبیت شده (درصد)	جلبک آزاد
۱۳۸۹	زمانی و همکاران	<i>Chlamydomonas</i>	۲۶/۹۴	۵۴/۹۲
۲۰۰۰	Tam & Wong	<i>Chlorella vulgaris</i>	۹۶	۵۹
۲۰۰۷	Fierro et al.	<i>Scenedesmus</i>	۹۶	۳۶
۱۳۹۴	تحقیق حاضر	<i>Spirulina</i>	۸۰	۶۹

رادوشکویچ استفاده می‌شود. ایزوترم فروندلیج برای جذب روی سطوح ناهمگون معتبر است و همان گونه که نمودار فروندلیج نشان می‌دهد (شکل ۳) ضریب همبستگی ($R^2=0/9515$) بین داده‌ها در این مدل نسبت به مدل لانگمویر مناسب‌تر می‌باشد به عبارتی می‌توان پیش‌بینی کرد که جذب توسط جلبک اسپیرولینا از نوع چند لایه می‌باشد. ایزوترم دوبینین - رادوشکویچ برای تعیین طبیعت فرآیند جذب سطحی به طور مختصر استفاده می‌شود و همان گونه که ضریب همبستگی ($R^2=0/818$) در نمودار دوبینین رادوشکویچ نشان می‌دهد (شکل ۴) این مدل، مدل مناسبی برای توصیف فرآیند جذب توسط جلبک اسپیرولینا نمی‌باشد. ایزوترم تمکین شامل عاملی است که به سرعت فعل و انفعال بین اجزای جذب شونده را بیان می‌کند که گرمای جذب سطحی همه مولکول‌های موجود در لایه پوشاننده به طور خطی کاهش می‌یابد و جذب توزیع یکسانی از انرژی‌های پیوندی دارد. ضریب همبستگی ($R^2=0/9815$) بین داده‌ها در نمودار تمکین نشان می‌دهد (شکل ۵) که این نوع ایزوترم پوشش نسبتاً مناسبی بر جذب

نتایج جدول (۹) نشانگر این است که میزان هوادهی همراه با ریزجلبک تثبیت شده می‌تواند راندمان حذف بالایی داشته باشد. مدل‌های جذب لانگمویر، فروندلیج، تمکین و دوبینین رادوشکویچ مبنای متداول در حذف آلاینده‌هایی مانند فسفر به کمک بیومس در سیستم Batch محسوب می‌شوند. در تحقیق حاضر داده‌های تعادلی جذب ارتوفسفات توسط جلبک اسپیرولینا به کمک مدل‌های لانگمویر، فروندلیج، دوبینین رادوشکویچ و تمکین مدل‌سازی شده است.

ایزوترم لانگمویر برای جذب تک لایه‌ها از روی سطوح با تعداد محدودی از موقعیت‌های جذب یکسان بکار می‌رود. ضریب همبستگی ($R^2=0/873$) در مدل لانگمویر نشان می‌دهد (شکل ۲) که معادله ایزوترم لانگمویر پوشش ضعیفی بر داده‌ها دارد با توجه به اینکه فرض مدل ایزوترم لانگمویر بر جذب تک لایه‌ای تأکید می‌کند، لذا پیش‌بینی می‌شود که جذب ارتوفسفات بر جلبک اسپیرولینا به عنوان جاذب تک لایه نبوده، بلکه ممکن است جذب از نوع چند لایه باشد. برای این منظور از ایزوترم‌های چند لایه ماند جذب فروندلیج و ایزوترم تمکین و دوبینین -

- removal by chitosan immobilized *Scenedesmus*. *Bioresource Technology*, 99 (5): 1274-1279.
- Ghasemi, Y., Moradian, A., Mohagheghzadeh, A., Shokravi, S. & Morowvat, M. 2007. Antibacterial activity of the microalgae collected from paddy fields of Iran: Characterization of antimicrobial activity of *chroococcus disperses*. *Journal of Biological Science*, 7 (6): 904-910.
- Martinez, M. E., Sanchez, S., Jimenez, J. M., El Yousfi, F. & Munoz, L. 2000. Nitrogen and phosphorus removal from urban wastewater by the microalga *Scenedesmus obliquus*. *Bioresource Technology*, 73:263-272-277.
- Nunez, V. J., Voltolina, D., Nieves, M., Pina, P., Medina, A. & Guerrero, M. 2001. Nitrogen budget in *Scenedesmus obliquus* cultures with artificial wastewater. *Bioresource Technology*, 78: 161-164.
- Obaja, D., Mace, S., Costa, J., Sans, C. & Mata-Alvarez, J. 2003. Nitrification, denitrification and biological phosphorus removal in piggery wastewater using sequencing batch reactor. *Bioresource Technology*, 87: 103-111.
- Pinar, A.K., Cengiz, K. & Olgun, G. 2010. Preparation of quaternized dimethylaminoethylmethacrylate grafted nonwoven fabric for the removal of phosphate. *Journal of Radiation Physics and Chemistry*, 79(4): 233- 237.
- Schumacher, G., Blume, T., Sekoulov, I. 2003. Bacteria reduction and nutrient removal in small wastewater treatment plants by an algal biofilm. *Water Sci. Water Science and Technology*, 47: 195-202.
- Semple, K. T., Cain, R. B. & Schmidt, S. 1999. Biodegradation of aromatic compounds by microalgae. *FEMS Microblog Letters*, 170: 291-300.
- Smita, S. & Ashok, K.S. 2006. Biological phosphate removal by model based continuous cultivation of acinetobacter calcoaceticus. *Journal of Process Biochemistry*, 41(3): 624-630.
- Tam, N. F. Y. & Wong, Y. S. 2000. Effect of immobilized microalgae bead concentrations on wastewater nutrient removal. *Environmental. Pollution*, 107 (1): 145-151.
- ارتوفسفات توسط ریز جلبک اسپیرولینا دارد. بنابر این می‌توان اظهار داشت که با توجه به ضریب همبستگی (R^2) در ایزوترم‌های فروندلیچ و تمکین، ایزوترم‌های جذب لانگمویر و دوبینین رادوشکویچ برای پیش‌بینی میزان جذب ارتوفسفات توسط ریزجلبک اسپیرولینا مناسب‌تر می‌باشد و فرآیند جذب چند لایه‌ای فرض می‌شود.
- ### منابع
- ثابتی، م. ب.، حجازی، م. ا. و کریمی، ا. ۱۳۹۲. حذف آنیون‌های نترات و فسفات با استفاده از ریزجلبک *Chorella vulgaris* و بررسی اثر گاز دی اکسید کربن در سرعت حذف. شانزدهمین همایش ملی محیط زیست. وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی استان آذربایجان شرقی.
- زمانی، ن.، نوشادی، م.، امین، س.، نیازی، ع. و قاسمی، ی. ۱۳۹۱. اثر و تثبیت ریزجلبک کلامیدوموناس برای حذف ارتوفسفات از پساب شهری، مجله آب و فاضلاب، ۲۳(۲): ۵۹-۶۶.
- کرمانی، م.، بینا، ب.، موحدیان، ح.، امین، م. و نیک آیین، م. ۱۳۸۹. بررسی عملکرد و مدل سازی فرایند بیوفیلمی با بستر متحرک به منظور حذف ترکیبات مغذی از فاضلاب. مجله آب و فاضلاب، ۲۱(۷۵): ۹.
- محمد یاری، ن. و بلاد. ع. ۱۳۸۷. بررسی عملکرد راکتور بیوفیلمی بستر متحرک (MBBR) در تصفیه مخلوط فاضلاب‌های شهری و صنعتی مطالعه موردی: تصفیه خانه فاضلاب پرکن‌آباد مشهد. مجله آب و فاضلاب، ۱۹(۱): ۴۶-۳۸.
- Belay, A. 2002. The potential application of *Spirulina* (Arthrospira) as a nutritional and therapeutic supplement in health management. *The Journal of the American Nutraceutical Association JANA*, 5(2):27-48.
- De-Bashan, L. E., Trejo, A. & Huss, V. A. R. 2008. *Chlorella sorokiniana* UTEX 2805, a heat and intense, sunlight-tolerant microalga with potential for removing ammonium from wastewater. *Bioresource Technology*, 99:4980-4989.
- Fierro, S., Sanchez-Saavedra, M. D. P. & Copalca, C. 2007. Nitrate and phosphate